

Aus der Frauenklinik mit Poliklinik
der Universität Erlangen-Nürnberg
Direktor: Professor Dr. med. K. G. Ober

Zur Strahlenbelastung bei Untersuchungen mit einem Therapiesimulator

**2. Mitteilung: Strahlenbelastung des Untersuchers bei Röntgen-
durchleuchtungen (Messungen am Alderson-Man-Phantom)**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
dem Fachbereich Medizin
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt
von
Wolfgang Albert Berger
aus
Leonberg

D 29

1976

Gedruckt mit Erlaubnis des Fachbereichs Medizin
der Universität Erlangen-Nürnberg



Dekan: Prof. Dr. E. Rügheimer

Referent: Prof. Dr. J. Weishaar

Korreferent: Prof. Dr. K.-G. Ober

Tag der mündlichen Prüfung: 09. August 1976

Sonderdruck

Strahlentherapie

Archiv für klinische und
experimentelle Radiologie

Die in dieser Zeitschrift veröffentlichten Beiträge sind urheberrechtlich geschützt. Übersetzung, Nachdruck – auch von Abbildungen –, Vervielfältigung jeder Art, Vortrag, Funk- und Fernsehsendung sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen – auch auszugsweise – vorbehalten. Von einzelnen Beiträgen oder Teilen von ihnen dürfen nur einzelne Exemplare zum persönlichen und sonstigen eigenen Gebrauch hergestellt werden. Jede im Bereich eines gewerblichen Unternehmens zulässig hergestellte oder benutzte Kopie dient gewerblichen Zwecken gem. § 54 (2) UrhG und verpflichtet zur Gebührenzahlung an die VG Wissenschaft GmbH, Frankfurt a. M. 1, Großer Hirschgraben 17/21. Werden Wertmarken der VG Wissenschaft verwendet, so ist jedes vervielfältigte Blatt mit einer Marke im Wert von DM 0,40 zu versehen. © Urban & Schwarzenberg, München – Berlin – Wien 1975.

Eine Markenbezeichnung kann warenzeichenrechtlich geschützt sein, auch wenn bei ihrer Verwendung in dieser Zeitschrift das Zeichen ® oder ein anderer Hinweis auf etwa bestehende Schutzrechte fehlen sollte.

Urban & Schwarzenberg



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Zur Strahlenbelastung bei Untersuchungen mit einem Therapiesimulator

2. Mitteilung: Strahlenbelastung des Untersuchers bei Röntgendurchleuchtungen (Messungen am Alderson-Man-Phantom)

M. Säbel, A. Berger, J. Weishaar

Strahlenabteilung (Abteilungsvorsteher: Prof. Dr. J. Weishaar) der Universitäts-Frauenklinik Erlangen (Direktor: Prof. Dr. K. C. Ober)

Bei Beurteilung der Strahlenbelastung beruflich strahlenexponierter Personen pflegt man heute somatische Effekte – wie z. B. somatisches “crossing over”, Entwicklungsstörungen und Induktion von Krebs – wieder stärker zu berücksichtigen und somit dem individuellen Risiko mehr Beachtung zu schenken. Zur Beurteilung dieses Strahlenrisikos müssen die jeweiligen Organdosen bekannt sein; letztere können mit Hilfe bekannter Gewebe-Luft-Verhältnisse abgeschätzt werden, wenn das Störstrahlenfeld der Röntgeneinrichtung bekannt ist. Um Aussagen über die bei Durchleuchtungen mit einem Therapiesimulator auftretende Strahlenbelastung des Untersuchers machen zu können, wurde in der vorliegenden Arbeit das Störstrahlenfeld der Röntgeneinrichtung bestimmt. Dazu wurden bei einer Röhrenspannung von 84 kV am Alderson-Man-Phantom Richtungsverteilungen der Ortsdosisleistung für Hautfeldgrößen von 25 cm², 100 cm² und 400 cm² bei Abständen von 50 cm, 100 cm, 150 cm und 200 cm der Ionisationskammer vom Zentralstrahl und bei 90 cm, 130 cm und 160 cm Höhe über dem Fußboden gemessen. In einigen zusätzlichen Messungen wurde die Abhängigkeit der Streustrahlung von der Röhrenspannung, der Feldgröße, dem Abstand vom Zentralstrahl und der Höhe über dem Fußboden genauer untersucht. Außerdem wurde das Schwächungsvermögen einer leichten Strahlenschutzschürze (0,25 mm Bleigleichwert) bestimmt. Es zeigte sich, daß die Schürze bei einer Röhrenspannung von 84 kV noch etwa 3,6% der auftreffenden Störstrahlung durchläßt. Aus den vorliegenden Messungen ergeben sich wichtige Hinweise auf die möglichen Aufenthaltsplätze des Untersuchers während der Durchleuchtung. An einem praktischen Beispiel wird außerdem gezeigt, wie die Strahlenbelastung einzelner Organe abgeschätzt werden kann; so ergibt sich bei vorbereitenden röntgenologischen Maßnahmen für intrauterine Transfusionen für den Untersucher eine Gonadenbelastung von etwa 2 mR und eine Belastung der Augenlinsen von etwa 17 mR.

1. Einleitung

In der ersten Mitteilung [21] wurde über die Messung von Gewebe-Luft-Verhältnissen berichtet, mit deren Hilfe es möglich ist, die Strahlenbelastung des *Patienten* bei Röntgenuntersuchungen mit einem Therapiesimulator abzuschätzen. In dieser Arbeit soll über Ortsdosismessungen berichtet werden, aus denen die Strahlenbelastung des jeweiligen *Untersuchers* ermittelt werden kann.

Bei der Beurteilung der Strahlengefährdung des Menschen stand lange Zeit eine genetische Betrachtungsweise im Vordergrund. Heute neigt man dazu, somatische Effekte stärker zu berücksichtigen und somit dem individuellen Risiko der strahlenexponierten Person wieder mehr Beachtung zu schenken

[2, 11, 15, 30]. Bei diesen somatischen Strahlenschäden handelt es sich vor allem um genetische Änderungen in den Körperzellen, somatisches “crossing over”, Entwicklungsstörungen und Induktion von Krebs [11]. Während man noch vor einigen Jahren annahm, daß der weitaus vorherrschende Spätschaden die strahleninduzierte Leukämie sei, ist man heute aufgrund der Auswertung neuer epidemiologischer Erhebungen (z. B. an den Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki) und experimenteller Arbeiten zu der Erkenntnis gekommen, daß ionisierende Strahlung die Anzahl der malignen Neubildungen praktisch in jedem Organ des menschlichen Körpers vermehren kann [2, 10, 15, 24, 30]. Nach Jacobi [15] muß bei der Abschätzung des mittleren somatischen

Strahlenrisikos für das Krebs-/Leukämie-Verhältnis mit einem Mittelwert von 5:1 gerechnet werden. Allerdings ist die Latenzzeit dieser Krebsarten im Vergleich zur Leukämie größer.

Zur Beurteilung des individuellen Strahlenrisikos muß – abgesehen von Dosis-Risiko-Beziehungen – auch die Strahlenbelastung der einzelnen Organe bekannt sein. Dazu ist in unserem Fall, d. h. bei Röntgenuntersuchungen mit einem Therapiesimulator, die Kenntnis des Störstrahlenfeldes der Röntgeneinrichtung notwendig. Dann können mit Hilfe der von uns [21] gemessenen Gewebe-Luft-Verhältnisse bei bekannter Organtiefe die verschiedenen Organdosen abgeschätzt werden.

Die Störstrahlung ist die gesamte Strahlung außerhalb des Nutzstrahlenbereiches; sie enthält im wesentlichen die vom Patienten (bzw. Phantom) und von den Wänden des Röntgenraumes herrührende Streustrahlung und die vom Röhrenschutzgehäuse und von den Blenden durchgelassene Primärstrahlung (Durchlaßstrahlung) [7].

Die genaue Kenntnis des Störstrahlenfeldes einer Röntgeneinrichtung ist auch für die von der Röntgenverordnung (RöV) geforderte Abgrenzung von Kontroll- und Überwachungsbereichen von Bedeutung [4, 31].

Außerdem wird in § 39, Abs. 1 der RöV die Durchführung von Ortsdosis- oder Ortsdosisleistungsmessungen gefordert, „soweit es aus Gründen des Strahlenschutzes erforderlich ist“. Das ist bei einem Therapiesimulator der Fall, bei dem aufgrund der zahlreichen Einstellmöglichkeiten (s. [21]) auf Störstrahlen-Schutzvorrichtungen, die fest mit dem Gerät verbunden sind, verzichtet werden muß.

Der Untersucher ist damit – ähnlich wie bei C-Bügelstativen im Operationssaal – voll dem Störstrahlungsfeld in der Umgebung des Patienten und der Röntgeneinrichtung ausge-

setzt (und muß Strahlenschutzkleidung tragen). Aus der Kenntnis der Störstrahlenverteilung können dann Hinweise auf die möglichen Aufenthaltsplätze des Untersuchers während der Röntgendurchleuchtung gewonnen werden.

2. Methodik

Die Untersuchungen wurden an einem Therapiesimulator der Siemens AG durchgeführt, der bereits in der ersten Mitteilung [21] ausführlich beschrieben wurde. Das Gerät verfügt über eine Belichtungsautomatik für Röntgenaufnahmen und eine Helligkeitsstabilisierung der Bildverstärker – Fernsehkette für Durchleuchtungen, die jedoch abschaltbar sind. Bei unseren Messungen wurden aus Zweckmäßigkeitsgründen Röntgenröhrenspannung U und Röntgenröhrenstrom I manuell eingestellt.

Zur Messung der Störstrahlen-Dosisleistung $\dot{D}$ wurde (s. auch [21]) ein EIL-Dosimeter (Fa. Pitman, Weybridge, Surrey/England) verwendet.

Wegen der zu erwartenden kleinen Werte für $\dot{D}$ wurde für alle Messungen die Ionisationskammer B 37 A benützt, die ein Volumen von 350 cm^3 besitzt. Nach Angaben der Herstellerfirma beträgt die Richtungsabhängigkeit der Ionisationskammer ca. $\pm 5\%$; die Energieabhängigkeit liegt für den hier in Frage kommenden Energiebereich ($60 \text{ kV} \leq U \leq 110 \text{ kV}$) bei $\pm 2\%$. Außerdem wurde die Anzeige der B-37-A-Kammer mit der einer kalibrierten Siemens-Fingerhutkammer verglichen; dabei zeigte sich, daß die von der B-37-A-Kammer angezeigten Werte um ca. 12% höher lagen. In Anbetracht der Tatsache, daß für Strahlenschutzmessungen dieser Art eine Meßunsicherheit von $\pm 30\%$ als ausreichend betrachtet wird [14], wurde auf eine Korrektur der Meßwerte verzichtet. Der Vergleich der beiden Kammern wurde wegen der geringeren Empfindlichkeit der Fingerhutkammer im Nutzstrahlenbündel der Röntgenröhre durchgeführt; dies ist im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen zulässig, da die Energiespektren von Primär- und Streustrahlung in diesem Energiebereich nur wenig voneinander verschieden sind [26, 32] und die beiden Ionisationskammern nur eine geringe Energieabhängigkeit besitzen.

Abweichend von dem für Strahlenschutzmessungen in DIN 6815 [9] vorgeschlagenen Meßphantom (z. B. Wasserphantom mit den Abmessungen $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$), verwendeten wir ein Alderson-

Man-Phantom, das den tatsächlich vorliegenden Verhältnissen bei Röntgenuntersuchungen mit dem Therapiesimulator besser angepaßt ist. Als Untersuchungsregion wurde das kleine Becken gewählt; dementsprechend wurden die Scheiben 19 bis 35 des Phantoms als Streukörper verwendet. Die Feldmitte lag bei allen Messungen in der Mitte von Scheibe 31 (s. Abbildung 1).

Die Streustrahlenmessungen wurden in einem Raum von 600 cm Länge, 380 cm Breite und 290 cm Höhe durchgeführt. Die Position des Therapiesimulators

ist aus Abbildung 16 ersichtlich. Bei allen Messungen wurde die Rotationsachse in die Mitte des Phantoms gelegt und ein Fokus-Haut-Abstand von 60 cm eingestellt. Da der a.p.-Durchmesser von Scheibe 31 ca. 22 cm beträgt, ergibt sich damit ein Fokus-Achs-Abstand von 71 cm. Die Pendelachse liegt 130 cm über dem Boden; dementsprechend befand sich bei allen Messungen die Röntgenröhre ca. 90 cm unter der Decke des Raumes. Das Schema der Meßordnung kann Abbildung 2 entnommen werden.

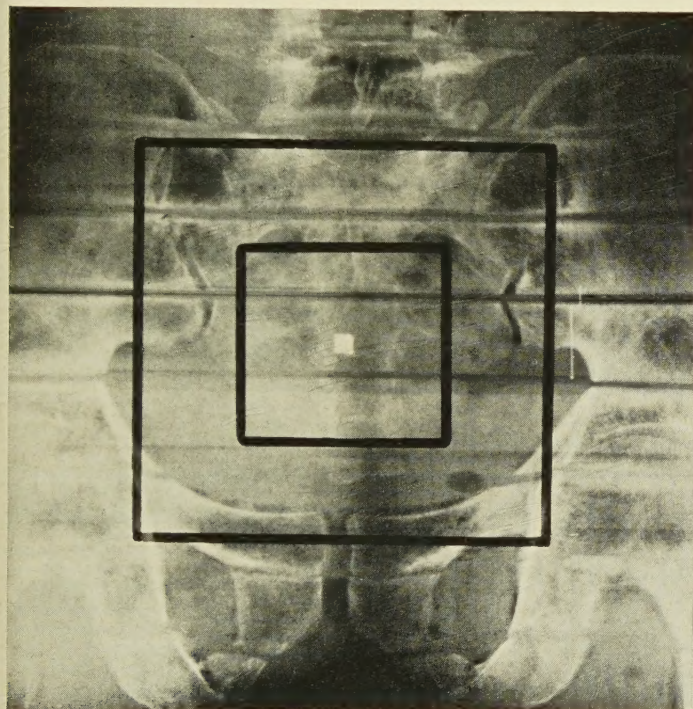


Abbildung 1. Lage der Bestrahlungsfelder im Alderson-Man-Phantom. Die eingezeichneten Feldgrenzen entsprechen den Hautfeldgrößen von 25 cm² und 100 cm²; die Bildränder begrenzen das 400 cm² große Feld. Die Bleimarke kennzeichnet die Feldmitte.

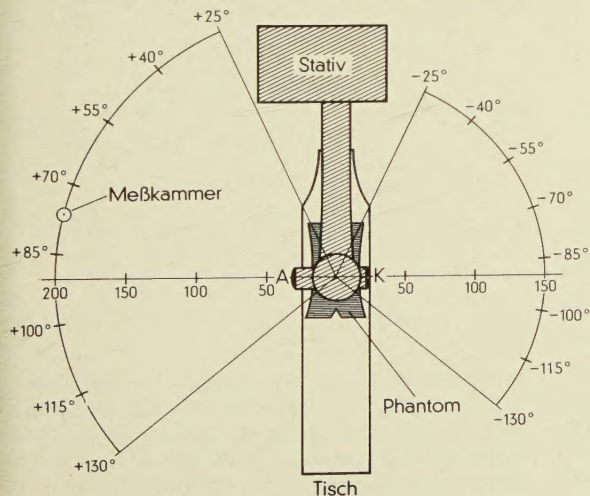


Abbildung 2. Meßordnung (schematisch) zur Bestimmung der Störstrahlung.

Die Ionisationskammer war an einem Kunststoffstativ befestigt; die Kammerachse stand bei allen Streustrahlungsmessungen parallel zum Zentralstrahl des Nutzstrahlenbündels. Die Höhe h der Kammer über dem Boden konnte zwischen 90 cm und 160 cm verändert werden.

Die Messungen der Richtungsverteilung der Streustrahlung wurden bei einer Höhe von 90 cm (ungefähre Höhe der Gonaden), 130 cm (Höhe der Pendelachse) und 160 cm (ungefähre Höhe der Augen) durchgeführt. Bei der Wahl des Abstandes r der Kammerachse vom Zentralstrahl und des Polarwinkels φ mußten die Konstruktion von Therapiesimulator und Patientenlagerungstisch sowie die sonstigen räumlichen Verhältnisse berücksichtigt werden. Die Messungen erfolgten in der Regel zwischen $\varphi = \pm 25^\circ$ und $\varphi = \pm 130^\circ$ in Schritten von 15° und bei Abständen r von 50 cm, 100 cm, 150 cm, und 200 cm. Die Feldgröße war stets quadratisch und betrug in 60 cm Abstand vom Fokus (Hautfeldgröße) 25 cm², 100 cm² und 400 cm². Die Lage der verschiedenen Felder zum Phantom ist aus Abbildung 1 zu ersehen.

Bei der Bestimmung der Richtungsverteilung wurde darauf geachtet, daß die gewählte Röhrenspannung U im Bereich der im praktischen Durchleuchtungsbetrieb vorkommenden Werte liegt. Da bei unserem Therapiesimulator die Röhrenspannung manuell nur stufenweise verändert werden kann, wurden die Messungen schließlich bei $U = 84$ kV vorgenommen.

Zusätzlich wurden einige Messungen durchgeführt, aus denen die Abhängigkeit der Streustrahlung von der Röhrenspannung, der Feldgröße, dem Abstand vom Zentralstrahl und der Höhe über dem Boden abgeschätzt werden kann; außerdem wurde der Schwächungsgrad einer Strahlenschutzschürze mit einem Bleigleichwert von 0,25 mm (leichte Schutzschürze nach DIN 6813 [7]) untersucht.

3. Ergebnisse

3.1. Richtungsverteilung der Störstrahlung

In Abbildung 3 bis 11 ist die Richtungsverteilung der Störstrahlung dargestellt. Jedes dieser Polardiagramme enthält die für verschiedene Abstände r vom Zentralstrahl bei konstanter Höhe h über dem Fußboden sowie bei konstanter Feldgröße A gemessenen Dosisleistungen.

Aus den einzelnen Abbildungen ergibt sich, daß die Störstrahlung bei konstantem Abstand r mit zunehmender Höhe h und Feld-

größe A ansteigt. Bei genauer Betrachtung zeigt sich, daß die Dosiswerte auf der rechten Seite des Patientenlagerungstisches (φ negativ; s. Abbildung 2) in der Regel höher liegen als auf der linken Seite; dies ist wahrscheinlich durch die Lage der Röhrenanode (s. Abbildung 2) und durch den kleineren Wandabstand bedingt (s. Abbildung 16).

3.2. Zusätzliche Störstrahlungsmessungen

Um zusätzliche Unterlagen für die Abschätzung der Strahlenbelastung bei einer Röntgenuntersuchung zu erhalten, wurde die Abhängigkeit der Störstrahlung von einigen charakteristischen Parametern gemessen. Die Messungen wurden dabei in der Regel auf die im Bezugspunkt P ($\varphi = +90^\circ$, $h = 130$ cm, $r = 100$ cm) bei $U = 84$ kV und $A = 10 \times 10$ cm² gemessene Dosisleistung $\dot{D}_0 = 9,1$ mR/mA · h bezogen.

3.2.1. Röntgenröhrenspannung

Im Bezugspunkt P wurde die Dosisleistung $\dot{D}$ bei $A = 10 \times 10$ cm² für verschiedene Röh-

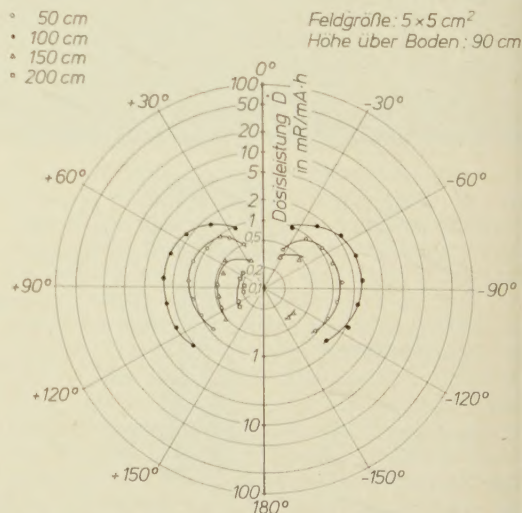


Abbildung 3. Richtungsverteilung der Störstrahlung (Dosisleistung – bezogen auf den Röhrenstrom – gemessen frei Luft). Röhrenspannung 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße: 25 cm²; Höhe über dem Fußboden: 90 cm.

- 50 cm
- 100 cm
- ▲ 150 cm
- ◻ 200 cm

Feldgröße: $10 \times 10 \text{ cm}^2$
Höhe über Boden: 90 cm

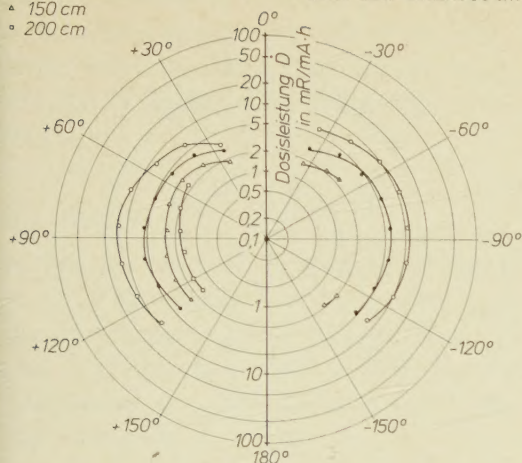


Abbildung 4. Richtungsverteilung der Störstrahlung (Dosisleistung – bezogen auf den Röhrenstrom – gemessen frei Luft). Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße: 100 cm^2 ; Höhe über dem Fußboden: 90 cm.

- 50 cm
- 100 cm
- ▲ 150 cm
- ◻ 200 cm

Feldgröße: $20 \times 20 \text{ cm}^2$
Höhe über Boden: 90 cm

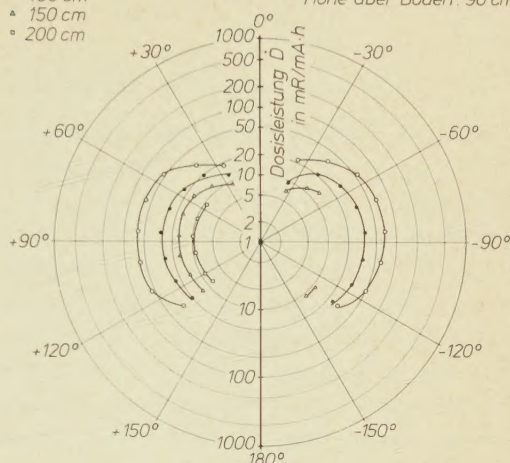


Abbildung 5. Richtungsverteilung der Störstrahlung (Dosisleistung – bezogen auf den Röhrenstrom – gemessen frei Luft). Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße 400 cm^2 ; Höhe über dem Fußboden: 90 cm.

- 50 cm
- 100 cm
- ▲ 150 cm
- ◻ 200 cm

Feldgröße: $5 \times 5 \text{ cm}^2$
Höhe über Boden: 130 cm

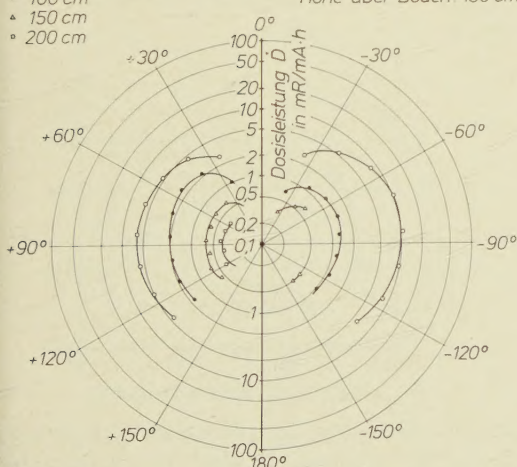


Abbildung 6. Richtungsverteilung der Störstrahlung (Dosisleistung – bezogen auf den Röhrenstrom – gemessen frei Luft). Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße: 25 cm^2 ; Höhe über dem Fußboden: 130 cm.

- 50 cm
- 100 cm
- ▲ 150 cm
- ◻ 200 cm

Feldgröße: $10 \times 10 \text{ cm}^2$
Höhe über Boden: 130 cm

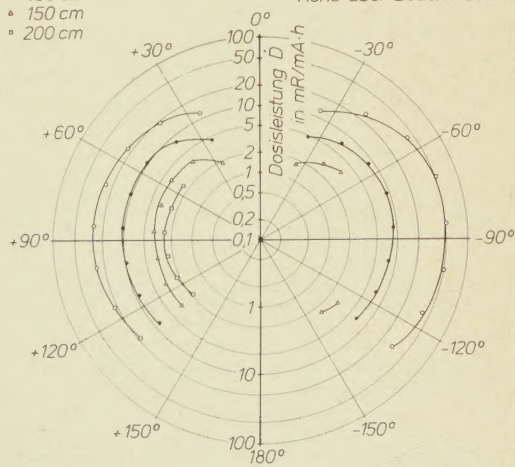


Abbildung 7. Richtungsverteilung der Störstrahlung (Dosisleistung – bezogen auf den Röhrenstrom – gemessen frei Luft). Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße 100 cm^2 ; Höhe über dem Fußboden: 130 cm.

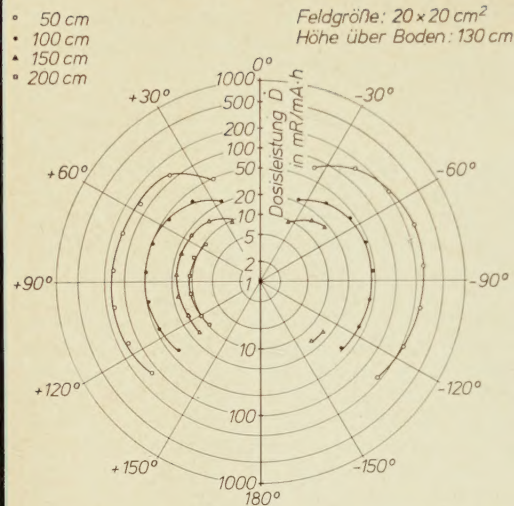


Abbildung 8. Richtungsverteilung der Störstrahlung (Dosisleistung – bezogen auf den Röhrenstrom – gemessen frei Luft). Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße: 400 cm^2 ; Höhe über dem Fußboden: 130 cm.

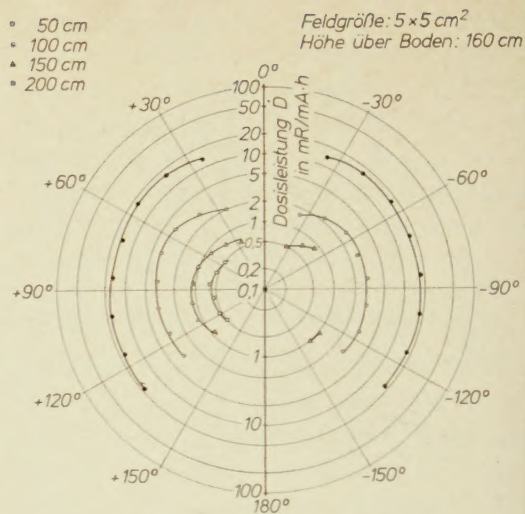


Abbildung 9. Richtungsverteilung der Störstrahlung (Dosisleistung – bezogen auf den Röhrenstrom – gemessen frei Luft). Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße: 25 cm^2 ; Höhe über dem Fußboden: 160 cm.

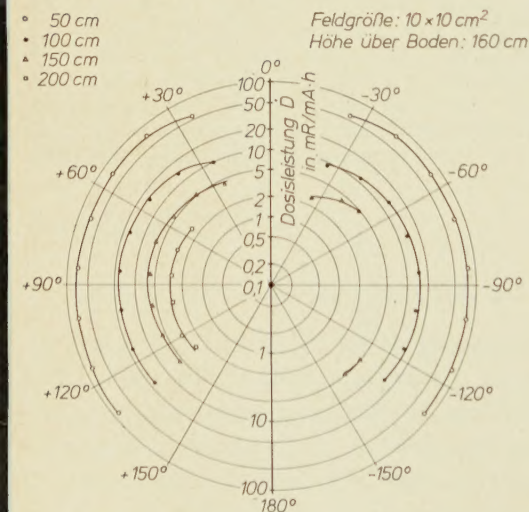


Abbildung 10. Richtungsverteilung der Störstrahlung (Dosisleistung – bezogen auf den Röhrenstrom – gemessen frei Luft). Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße 100 cm^2 ; Höhe über dem Fußboden: 160 cm.

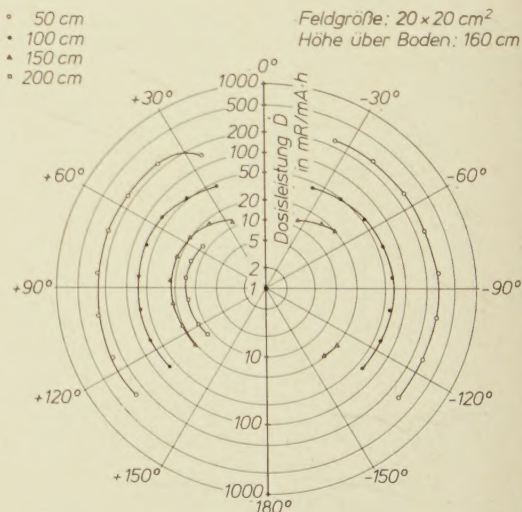


Abbildung 11. Richtungsverteilung der Störstrahlung (Dosisleistung – bezogen auf den Röhrenstrom – gemessen frei Luft). Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße: 400 cm^2 ; Höhe über dem Fußboden: 160 cm.

rensspannungen U gemessen. In Abbildung 12 (obere Kurve) ist der Quotient $q(U) = \dot{D}/\dot{D}_0$ in Abhängigkeit von der Spannung U dargestellt. Man sieht, daß $q(U)$ zwischen 60 kV und 110 kV fast um eine Größenordnung zunimmt.

3.2.2. Feldgröße

Im Punkt P wurde die Dosisleistung $\dot{D}$ bei $U = 84$ kV für verschiedene Feldgrößen A gemessen. Die obere Kurve von Abbildung 13 zeigt den Quotienten $q(A) = \dot{D}/\dot{D}_0$. Bei der Annäherung der Meßergebnisse durch eine Potenzfunktion

ergibt sich eine nahezu lineare Abhängigkeit von der Feldgröße ($q(A) \sim A^{1,12}$).

3.2.3. Abstand vom Zentralstrahl

Ausgehend vom Bezugspunkt P wurde die Dosisleistung $\dot{D}$ bei $U = 84$ kV und $A = 10 \times 10$ cm² für verschiedene Abstände r vom Zentralstrahl gemessen; φ und h blieben dabei konstant. Der Quotient $q(r) = \dot{D}/\dot{D}_0$ ist in Abbildung 14 dargestellt.

Nähert man die Meßergebnisse ebenfalls durch eine Potenzfunktion an, so zeigt sich, daß die Abnahme von $q(r)$ zunächst annähernd dem quadratischen Abstandsgesetz

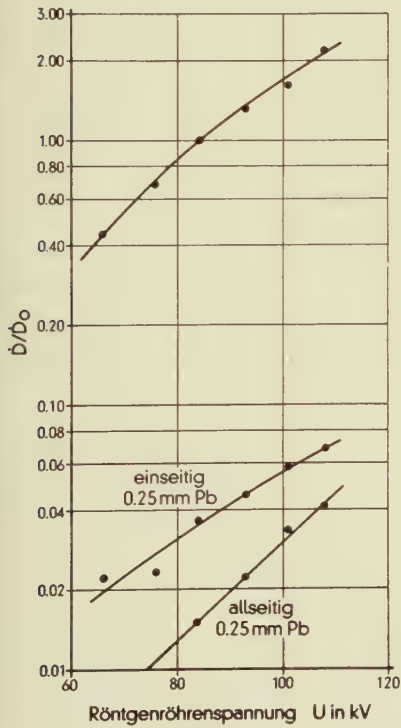


Abbildung 12. Dosisleistung – bezogen auf die Dosisleistung $\dot{D}_0$ im Punkt P – gemessen frei Luft in Abhängigkeit von der Röhrenspannung. Fokus-Haut-Abstand: 60 cm, Feldgröße: 100 cm²; Höhe über dem Fußboden: 130 cm; Abstand Kammer-Zentralstrahl: 100 cm. Näheres zu den mit „einseitig 0,25 mm Pb“ bzw. „allseitig 0,25 mm Pb“ bezeichneten Kurven s. Text.

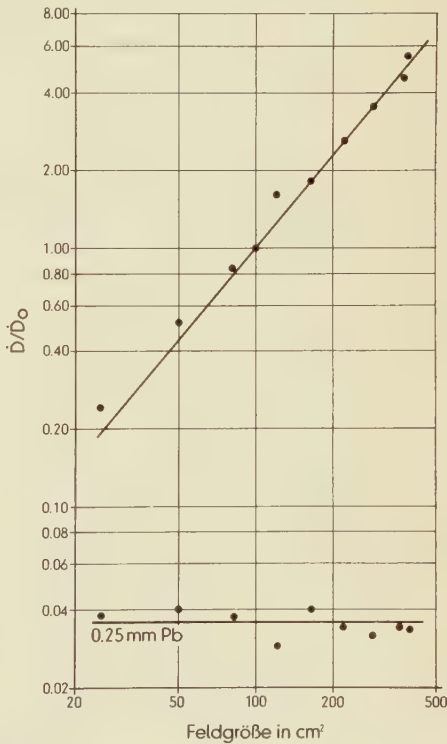


Abbildung 13. Dosisleistung – bezogen auf die Dosisleistung $\dot{D}_0$ im Punkt P – gemessen frei Luft in Abhängigkeit von der Feldgröße. Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Höhe über dem Fußboden: 130 cm; Abstand Kammer-Zentralstrahl: 100 cm. Näheres zu der mit „0,25 mm Pb“ bezeichneten Kurve s. Text.

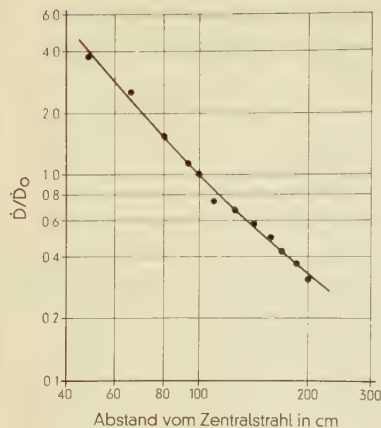


Abbildung 14. Dosisleistung – bezogen auf die Dosisleistung $\dot{D}_0$ im Punkt P – gemessen frei Luft in Abhängigkeit vom Abstand Kammer–Zentralstrahl. Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße: 100 cm²; Höhe über dem Fußboden: 130 cm.

folgt ($q(r) \sim r^{-1,95}$), dann aber für $r > 100$ cm mehr und mehr davon abweicht. Der Grund hierfür liegt sicherlich im zunehmenden Einfluß der von den Wänden des Raumes zurückgestreuten Strahlung.

3.2.4. Höhe über dem Fußboden

Ausgehend vom Bezugspunkt P wurde die Dosisleistung $\dot{D}$ bei $U = 84$ kV und $A = 10$

$\times 10$ cm² für verschiedene Höhen h über dem Fußboden gemessen; φ und r blieben konstant. Der Quotient $q(h) = \dot{D}/\dot{D}_0$ ist aus Abbildung 15 ersichtlich. Bei $h = 130$ cm – in der Höhe der Pendelachse – erfolgt ein starker Anstieg von $q(h)$. Dies ist vor allem auf die aus geometrischen Gründen (vgl. Abschnitt 2) abnehmende Schwächung der Streustrahlung durch das Phantommaterial zurückzuführen [25].

3.2.5. Einfluß einer Strahlenschutzschürze

Um einige Daten über das Schwächungsvermögen einer leichten Strahlenschutzschürze (mit 0,25 mm Bleigleichwert), wie sie bei Röntgendurchleuchtungen gewöhnlich getragen wird, zu erhalten, wurden einige zusätzliche Messungen im Punkt P durchgeführt.

Zunächst wurde die Strahlenschutzschürze im Strahlengang zwischen Ionisationskammer und Phantom unmittelbar vor der Ionisationskammer angebracht und die Dosisleistung $\dot{D}_{\text{Ph},1}$ bei verschiedenen Röhrenspannungen U für $A = 10 \times 10$ cm² gemessen. Das jeweilige Meßergebnis wurde dann durch den entsprechenden Wert $\dot{D}$ der Messung aus Abschnitt 3.2.1. dividiert. Der Quotient $q(U)$

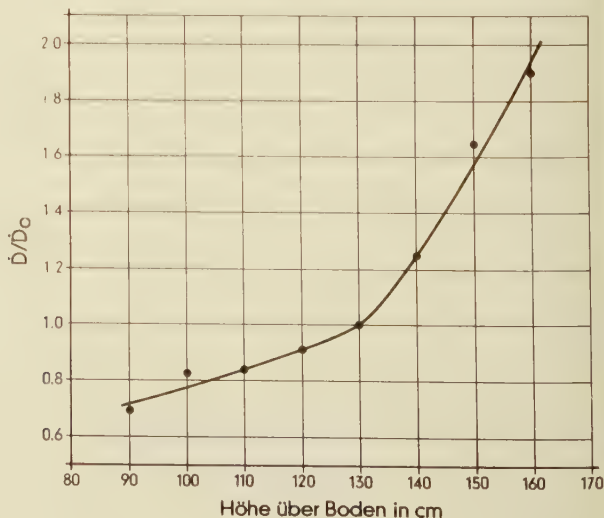


Abbildung 15. Dosisleistung – bezogen auf die Dosisleistung $\dot{D}_0$ im Punkt P – gemessen frei Luft in Abhängigkeit von der Höhe über dem Fußboden. Röhrenspannung: 84 kV; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße: 100 cm²; Abstand Kammer–Zentralstrahl: 100 cm.

= $\dot{D}_{\text{Pb},1}/\dot{D}$ ist in Abbildung 12 unter der Bezeichnung „einseitig 0,25 mm Pb“ dargestellt. Bei $U = 60$ kV werden etwa 2%, bei 110 kV dagegen schon etwa 7% der Streustrahlung durchgelassen. Dieser deutliche Anstieg von $q(U)$ ist darauf zurückzuführen, daß die mittlere Energie der Streustrahlung mit der Röhrenspannung U zunimmt und die Strahlung dementsprechend durchdringungsfähiger wird.

Anschließend wurde die Ionisationskammer allseitig von einer Strahlenschutzschürze umhüllt und wieder die Dosisleistung $\dot{D}_{\text{Pb},2}$ in Abhängigkeit von der Röhrenspannung U gemessen. Der Quotient $q(U) = \dot{D}_{\text{Pb},2}/\dot{D}$ ist in Abbildung 12 unter der Bezeichnung „allseitig 0,25 mm Pb“ eingetragen. Die erhaltenen Werte liegen deutlich unter den Ergebnissen für $q_{\text{Pb},1}$ und lassen somit auf einen merklichen Beitrag der von den Wänden des Raumes rückgestreuten Strahlung zu $\dot{D}_{\text{Pb},1}$ schließen.

In einer weiteren Messung wurde bei $U = 84$ kV die Dosisleistung $\dot{D}_{\text{Pb}}$ hinter der Strahlenschutzschürze in Abhängigkeit von der Feldgröße A gemessen. Anschließend wurde unter Verwendung der im Abschnitt 3.2.2. erhaltenen Werte der Quotient $q(A) = \dot{D}_{\text{Pb}}/\dot{D}$ gebildet und in Abbildung 13 unter der Bezeichnung „0,25 mm Pb“ eingetragen. Aus einer Korrelationsrechnung ergab sich, daß – unabhängig von der Feldgröße – bei $U = 84$ kV etwa 3,6% der Streustrahlung von der Strahlenschutzschürze durchgelassen werden.

3.2.6. Gehäusedurchlaßstrahlung

Die in Abbildung 3 bis 11 dargestellten Meßwerte $\dot{D}$ enthalten – wie schon in Abschnitt 1 erwähnt – noch einen Anteil, der von der Gehäusedurchlaßstrahlung herrührt. In DIN 6811 [5] wird im ungünstigsten Fall für diesen Anteil in ein Meter Abstand vom Brennfleck eine Dosisleistung von 100 mR/h zugelassen; dieser Grenzwert wird jedoch im all-

gemeinen von den Herstellern der Röntgeneinrichtungen nicht ausgenutzt. Eine Messung im Punkt P und im entsprechenden Punkt P' auf der Kathodenseite ($\varphi = -90^\circ$) ergab bei $U = 84$ kV eine Dosisleistung $\dot{D}_D \approx 0,05$ mR/mA · h. Ein Vergleich mit den Meßwerten $\dot{D}$ aus den Abbildungen 3 bis 11 zeigt, daß der Anteil der Gehäusedurchlaßstrahlung bei dieser Erzeugungsspannung in der Regel vernachlässigt werden kann; so ergibt sich z. B. für den Punkt P $\dot{D}_D/\dot{D}_0 \approx 0,5\%$.

Der Anteil der Gehäusedurchlaßstrahlung steigt mit zunehmender Röhrenspannung U . Messungen bei $U = 110$ kV ergaben im Punkt $\dot{D}_D = 0,15$ mR/mA · h und im Punkt P' $\dot{D}_D = 0,40$ mR/mA · h. Daraus errechnet sich für den Quotienten $\dot{D}_D/\dot{D}_0 \cdot q(U)$ (s. Abschnitt 3.2.1.) ein Wert von etwa 0,7% bzw. 2,0%.

Außerdem steigt die Gehäusedurchlaßstrahlung mit zunehmender Annäherung an die Röntgenröhre. Bei einer Messung unmittelbar an der Oberfläche des Röhrengehäuses wurden folgende Maximalwerte ermittelt:

$U = 84$ kV; Kathodenseite: 0,7 mR/mA · h
 Anodenseite: 0,4 mR/mA · h
 $U = 110$ kV; Kathodenseite: 12 mR/mA · h
 Anodenseite: 4 mR/mA · h

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Gehäusedurchlaßstrahlung zu den aus den vorhergehenden Abschnitten ersichtlichen Ergebnissen in der Regel nur einen kleinen Beitrag liefert, so daß die erhaltenen Dosisleistungswerte im wesentlichen von der Streustrahlung herrühren und als solche im folgenden Abschnitt diskutiert werden sollen.

4. Diskussion

Ein Vergleich der in Abschnitt 3 dargestellten Ergebnisse mit den Messungen anderer Autoren (z. B. [3, 25–29, 32]) ist nicht ohne weiteres möglich, da die einzelnen Meßwerte

u. a. von der Meßanordnung und von den räumlichen Verhältnissen abhängen. Die von uns gefundenen Beziehungen zwischen der Größe der Streustrahlendosis und den verschiedenen Bestrahlungsparametern fügen sich jedoch gut in die aus der Literatur bekannten Ergebnisse ein. Dies soll an einigen Beispielen aufgezeigt werden:

A) Bei der Errichtung von medizinischen Röntgenanlagen – insbesondere bei der Berechnung der erforderlichen Schutzschichten gegen Störstrahlung – muß der Ausbeutungskoeffizient für Streustrahlung k bekannt sein, der gewöhnlich [6, 18, 19] durch den Quotienten

$$k = \dot{D}_{PR} / \dot{D}_{STR}$$

definiert wird. Dabei ist $\dot{D}_{PR}$ die Dosisleistung im Zentralstrahl in der Mitte des Streukörpers (gemessen frei Luft, d. h. ohne Anwesenheit des Streukörpers) und $\dot{D}_{STR}$ die Dosisleistung der Streustrahlung in einem Meter Abstand von der Mitte des Streukörpers. Der Quotient k hängt von der Röhrenspannung, der Feldgröße und vom Streuwinkel ab. Oft wird jedoch in den Strahlenschutzrichtlinien für Röntgenstrahlen mit Röhrenspannung U bis zu 300 bzw. 500 kV nur ein einzelner Wert angegeben. Im NCRP-Report Nr. 26 [18] wird z. B. empfohlen, bei der Berechnung von Schutzschichten gegen Streustrahlung (bei $U \leq 500$ kV) $k = 0,001$ einzusetzen. Im NCRP-Report Nr. 34 [19] fehlen für $U \leq 500$ kV konkrete Zahlenangaben für k , und es wird nur auf die Abhängigkeit von den oben erwähnten Parametern hingewiesen. In DIN 6812 [6] schließlich wird für Röhrenspannungen bis 300 kV $k = 0,002$ festgesetzt. Aus den in Abschnitt 3 dargestellten Ergebnissen können die interessierenden k -Werte mit Hilfe der aus [21] bekannten Dosisleistungen $\dot{D}_{PR}$ berechnet werden. So ergibt sich z. B. für den Bezugspunkt

P (Winkel zwischen Zentralstrahl und Streurichtung: $\psi = 90^\circ$; s. Abschnitt 3.2.) bei einer Feldgröße $A = 100 \text{ cm}^2$

für $U = 60 \text{ kV}$	$k = 0,10 \cdot 10^{-3}$ und
für $U = 110 \text{ kV}$	$k = 0,21 \cdot 10^{-3}$.

Trout und Mitarbeiter [26, 27] haben umfangreiche Streustrahlungsmessungen mit einer ähnlichen Meßanordnung durchgeführt. Aus den Ergebnissen in [27] können die k -Werte für $\psi = 90^\circ$ und $A = 100 \text{ cm}^2$ abgeschätzt werden. Man erhält

für $U = 60 \text{ kV}$	$k = 0,12 \cdot 10^{-3}$ und
für $U = 110 \text{ kV}$	$k = 0,22 \cdot 10^{-3}$.

In Anbetracht der erreichbaren Meßgenauigkeit und der bei der Abschätzung auftretenden Unsicherheitsfaktoren, darf dieser guten Übereinstimmung natürlich nicht zu viel Bedeutung beigemessen werden. Andererseits ergibt sich daraus, daß für Strahlenschutz Zwecke eine Tabellierung des Ausbeutungskoeffizienten k für die verschiedenen Parameter (Röhrenspannung, Feldgröße, Streuwinkel) durchaus nützlich sein kann. Außerdem sieht man (vgl. Abschnitt 3.2.), daß der in DIN 6812 angegebene Wert von $k = 2 \cdot 10^{-3}$ bei höheren Röhrenspannungen, großen Feldern und ungünstigen Streuwinkeln durchaus überschritten werden kann.

B) Aus den in Abschnitt 3.2.2. dargestellten Messungen ergibt sich, daß die Dosisleistung der Streustrahlung annähernd linear mit der Feldgröße ansteigt. Dieser Zusammenhang wird auch von anderen Autoren bestätigt [19, 25, 26], so daß seine Verwendung bei Abschätzungen im Zusammenhang mit Strahlenschutzproblemen gerechtfertigt erscheint. Trout und Kelley [26] weisen allerdings in diesem Zusammenhang darauf hin, daß größere Abweichungen von dieser linearen Abhängigkeit auftreten können, wenn das Ein-

fallsfeld nicht mehr symmetrisch zum Phantom liegt, sondern zum Rand des Streukörpers hin verschoben ist.

C) Bei der Abschätzung der Streustrahlen-Dosisleistung für einen bestimmten Punkt P' im Abstand r von der Mitte des Streukörpers aus der bekannten Dosisleistung im Bezugspunkt P wird in der Regel die Gültigkeit des quadratischen Abstandsgesetzes vorausgesetzt [6, 18, 19]. Die in Abschnitt 3.1. und 3.2.3. dargestellten Ergebnisse zeigen jedoch, daß dieser Zusammenhang nur annähernd gültig ist.

Rückstreuung von den Wänden des Raumes und unsymmetrische Lage des Bestrahlungsfeldes zum Meßphantom [25] können Abweichungen verursachen, so daß es für genauere Abschätzungen günstiger ist, die Dosisleistung in P' z. B. durch Interpolation aus den in den Abbildungen 3 bis 11 dargestellten Ergebnissen zu bestimmen.

D) Die bei unserer Meßanordnung auftretende Zunahme der Streustrahlen-Dosisleistung mit der Höhe über dem Fußboden ist in ähnlicher Form auch von anderen Autoren beobachtet worden [25, 26]. Der steile Anstieg oberhalb von $h = 130$ cm ist – wie schon in Abschnitt 3.2.4. erwähnt – vor allem dadurch bedingt, daß die Schwächung der Streustrahlung durch das Phantommaterial immer kleiner wird und schließlich der Meßort den Mittelpunkt des Einfallsfeldes „sieht“ [25]. Dieses Verhalten der Streustrahlung ist von Bedeutung für die Strahlenbelastung des Untersuchers vor allem dann, wenn die Röhre, wie dies z. B. bei vorbereitenden röntgenologischen Maßnahmen für intrauterine Transfusionen (s. [21]) der Fall ist, als Untertischröhre betrieben wird. Dann befinden sich nämlich die Gonaden des Untersuchers auf der röhrennahen Seite des Strahlenganges und damit im Bereich der vom Einfallsfeld ausgehenden Streustrahlung. Ein Beispiel für

die auftretende Strahlenbelastung der Gonaden bei dieser Anordnung wird in Abschnitt 5.2. gegeben.

E) Die für das Schwächungsvermögen (durchgelassene Strahlung in Prozent der einfallenden Strahlung) einer leichten Strahlenschutzschürze bei verschiedenen Röhrenspannungen U erhaltenen Werte (s. Abschnitt 3.2.5.) zeigen relativ gute Übereinstimmung – die größten Abweichungen liegen zwischen 20 und 30% – mit den in [13, 19, 26, 27] veröffentlichten Werten. Sie liegen jedoch durchwegs unter den in DIN 6813 [7] angegebenen Richtwerten (z. B. ca. sechs Prozent bei $U = 84$ kV) für die Strahlenschwächung durch Röntgenschutzkleidung. Daraus kann man schließen, daß in den DIN-Richtwerten noch ein Sicherheitsfaktor enthalten ist.

5. Anwendungsbeispiele

Abschließend soll an zwei Beispielen aufgezeigt werden, wie aus den in Abschnitt 3 dargestellten Meßergebnissen Daten und Hinweise erhalten werden können, die für den praktischen Strahlenschutz von Bedeutung sind.

5.1. Konstruktion einer Isodosenverteilung

Für einige Fragestellungen (z. B. bei der Festlegung von Kontroll- und Überwachungsbereichen) erweist es sich als zweckmäßiger, die Ergebnisse von Ortsdosismessungen in Form sogenannter Isodosenkurven zu veranschaulichen. An einem Beispiel soll gezeigt werden, daß diese Kurvenscharen aus den Ergebnissen der Abbildungen 3 bis 11 ohne weiteres ermittelt werden können.

Für die Konstruktion der Isodosen wurden die für $h = 130$ cm (Höhe der Pendelachse des Therapiesimulators) und $A = 100$ cm² bei $U = 84$ kV gemessenen Werte (s. Abbildung 7) verwendet; dabei wurden für diesen

Fall einige zusätzliche Werte für $\varphi = 180^\circ$ (d. h. in der Pendelachse; s. Abbildung 2) gemessen. Die einzelnen Punkte wurden durch graphische Interpolation ermittelt. Dazu wurden die für einen bestimmten Winkel φ bei verschiedenen Abständen r gemessenen Dosisleistungswerte $\dot{D}$ über r aufgetragen und anschließend der einem Isodosenpunkt zugeordnete Abstand r abgelesen. Die so ermittelten Abstände r wurden in ein Polar-diagramm eingetragen. Das Ergebnis ist in Abbildung 16 dargestellt.

Die Isodosen zeigen die durch die Lage des Bestrahlungsfeldes zum Phantom (kleines Becken) bedingte charakteristische Form, d. h. Ausbuchtungen am „Fußende“ und deutliche Einschnürungen am „Kopfende“. Außerdem ergeben sich aus der Darstellung

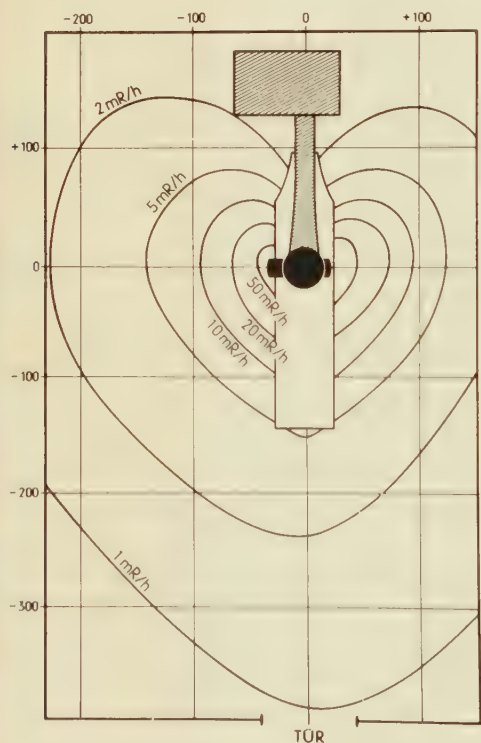


Abbildung 16. Isodosenverteilung im Therapiesimulator-Raum. Röhrenspannung: 84 kV; Röhrenstrom: 1 mA; Fokus-Haut-Abstand: 60 cm; Feldgröße: 100 cm²; Höhe über dem Fußboden: 130 cm.

sofort einige Hinweise für den Aufenthaltsort des Untersuchers und etwaiger anderer bei der Röntgenuntersuchung anwesender Personen: Sie sollten sich möglichst nicht in den Bereichen aufhalten, die in der Nähe der Pendelachse ($\varphi = 180^\circ$) oder senkrecht dazu ($\varphi = \pm 90^\circ$) liegen.

5.2. Abschätzung der Strahlenbelastung des Untersuchers

Als Beispiel für die während einer Röntgenuntersuchung auftretende Strahlenbelastung des Untersuchers soll die bei vorbereitenden röntgenologischen Maßnahmen für intrauterine Transfusionen zu erwartende Dosis abgeschätzt werden.

Wir werden uns dabei auf die Abschätzung der Dosis an den Gonaden und an den Augenlinsen beschränken. Die Strahlenbelastung der Gonaden spielt in den zur Zeit gültigen Strahlenschutzverordnungen und -empfehlungen immer noch eine entscheidende Rolle. Trübungen der Augenlinse treten zwar erst nach einer einmaligen Bestrahlung mit mehr als 200 R bzw. einer stark fraktionierten Bestrahlung mit mehr als 550 R auf [12], jedoch wird immer wieder darauf hingewiesen [1, 17, 20, 22, 23], daß der Strahlenbelastung der Augen bei Röntgenuntersuchungen große Aufmerksamkeit geschenkt werden muß, damit die von der ICRP empfohlene, höchstzulässige Dosis von 15 rem/Jahr [12] nicht überschritten wird.

Für die Bestimmung der Strahlenbelastung anderer Organe (z. B. von Teilen des Knochenmarks) muß in der Regel noch die Organtiefe bekannt sein. Da Primär- und Streustrahlung – wie schon erwähnt (s. Abschnitt 2) – in diesem Energiebereich annähernd das gleiche Absorptionsverhalten zeigen, kann dann die Strahlenbelastung mit Hilfe der in [21] gemessenen Gewebe-Luft-Verhältnisse nach dem dort angegebenen Verfahren abge-

schätzt werden. Bei der oben erwähnten Vorbereitung von intrauterinen Transfusionen unter Durchleuchtungskontrolle wird die Röhre als Untertischröhre verwendet, da der Untersucher im Strahlengang (auf der Strahlenaustrittsseite) arbeiten muß (z. B. Einführen der Kanüle); sein mittlerer Abstand vom Zentralstrahl beträgt dabei etwa 75 cm. Als typische Daten (s. [21]) werden eine Durchleuchtungsspannung von 80 kV, ein Röhrenstrom von 2 mA und eine Feldgröße von etwa $20 \cdot 20 \text{ cm}^2$ angenommen. Unter Verwendung der Ergebnisse aus Abschnitt 3 erhält man dann für die hier vorliegende Geometrie der Anordnung eine Dosisleistung von etwa 190 mR/h an den Gonaden und 50 mR/h am Auge. Durch eine leichte Strahlenschutz-

schürze mit 0,25 mm Bleigleichwert kann die Dosisleistung an den Gonaden auf etwa 7 mR/h (s. Abschnitt 3.2.5.) verringert werden.

Da meistens zwei bis drei intrauterine Transfusionen notwendig sind, können in Grenzfällen Durchleuchtungszeiten von insgesamt 20 Minuten auftreten. Für den Untersucher ergibt sich dann eine Strahlenbelastung der Gonaden von ca. 2 mR und der Augenlinse von ca. 17 mR.

Anmerkung

Wir danken Herrn Professor Dr. Dr. H. Pauly, Direktor des Instituts für Radiologie der Universität Erlangen-Nürnberg, für die Überlassung des EIL-Dosimeters und des Alderson-Man-Phantoms.

Radiation exposure during examination with a therapy simulator.

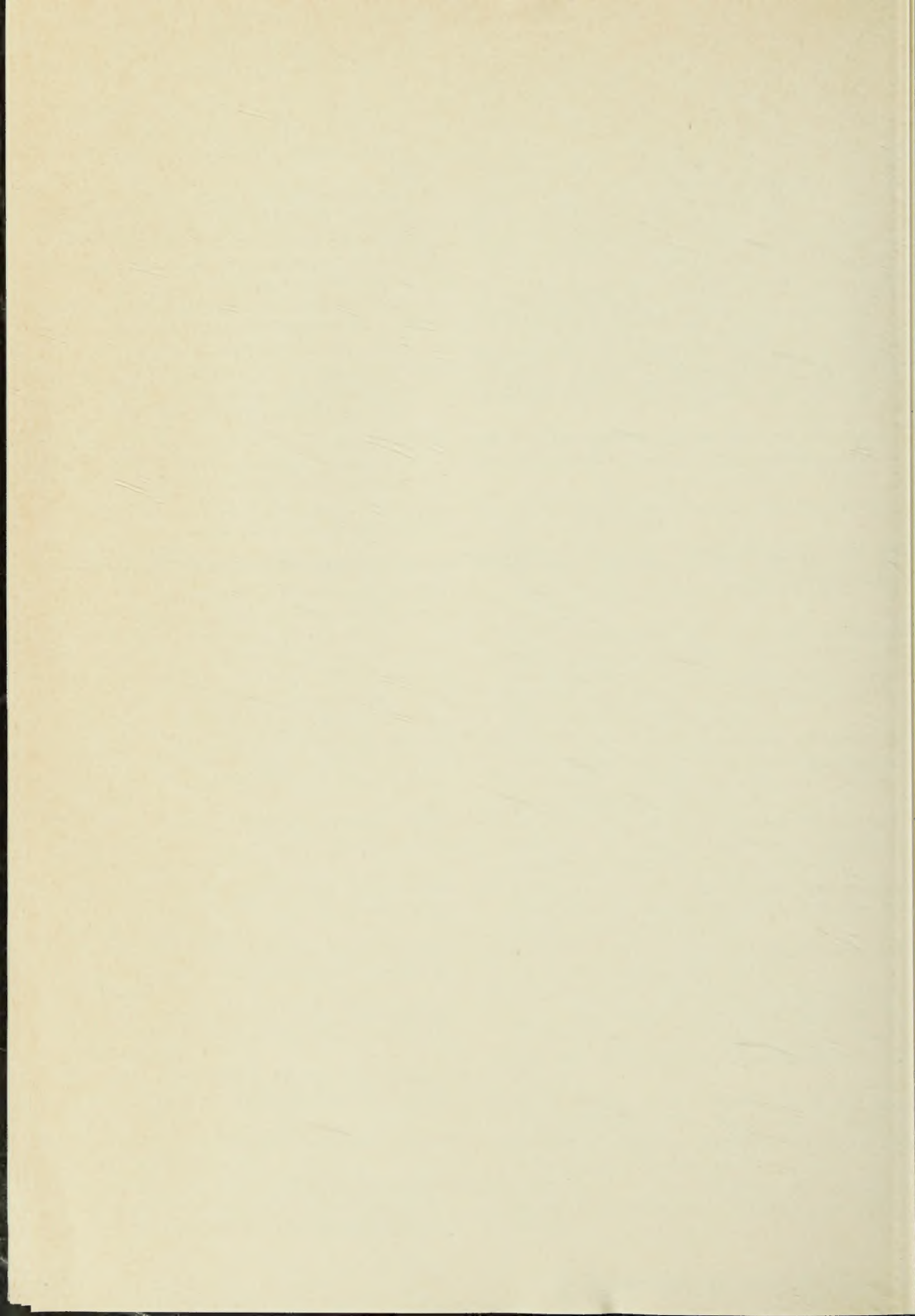
2nd communication: Radiation load on the examiner during radioscopical examination (Alderson-Man-phantom measurements)

In judging the risk incurred by persons professionally exposed to radiation, there is at present a more distinct tendency towards consideration of somatic effects – as e. g. somatic “crossing over”, accidents of development, induction of cancer; thus more attention is paid to individual risk. For assessment of this radiation risk, the organ doses in question must be known; they can be estimated by means of the ascertained tissue-air-ratios, if the field of stray radiation from the X-ray equipment is known. To obtain data for statements with regard to the radiation load on the examiner during radioscopy with a therapy simulator, it was necessary to determine the stray radiation field of the X-ray apparatus. Therefore, using an Alderson-Man-phantom, the angular distribution of the local dose rate were measured at a tube voltage of 84 kV. The skin irradiation fields had dimensions of 25 cm^2 , 100 cm^2 , and 400 cm^2 at the distances 50 cm, 100 cm, 150 cm, and 200 cm of the ionization chamber from the central ray. The measurements were performed on levels of 90 cm, 130 cm, and 160 cm above the floor. Some additional measurements aimed at a more exact investigation of the dependency of scattered radiation upon the tube voltage, the area of the radiation field, the distance from the central ray, and the height above the floor. The attenuation capacity of a light radioprotective apron (0.25 mm lead equivalence) was also determined. It turned out that, at a tube voltage of 84 kV, the apron still was passed by about 3.6% of the hitting stray radiation. The present measurements yield important indications of the best possible locations of the examiner during radioscopy. A practical example is given showing how to assess the radiation load on single organs; the results show that the examiner is exposed to a gonadal load of about 2 mR and to a load of about 17 mR on the crystalline lenses, while engaged in preparative roentgenologic measures for intrauterine transfusions.

Sur la charge de rayons pendant des examens avec un simulateur de thérapie.

2ème communication: charge des rayons de l'examineur dans le cas de radioscopies (mesurages sur le fantôme d'Alderson-Man)

Pour le jugement des personnes exposées aux rayons dans leur profession, on a actuellement tendance à reprendre en considération les effets somatiques, comme par exemple le «crossing over» somatique, les troubles de développement et l'induction du cancer et, par conséquent, à tenir compte plus intensivement du risque individuel. Pour le jugement de ce risque radio-



Lebenslauf

Am 8. November 1950 wurde ich als 2. Kind des Sonderschullektors Rupert Berger und seiner Ehefrau Maria, geb. Guggenberger, in Leonberg/Landkreis Schwandorf geboren. Vom Herbst 1957 bis zum Sommer 1961 besuchte ich die Volksschule in Maxhütte. Im Herbst 1961 erfolgte der Übertritt ans Gymnasium Schwandorf, wo ich im Juni 1970 die Reifeprüfung bestand.

Vom Wintersemester 1970/71 an studierte ich an der Universität Regensburg Medizin und legte dort im Wintersemester 1972/73 die ärztliche Vorprüfung ab.

Den klinischen Teil des Medizinstudiums setzte ich vom Sommersemester 1973 an in Erlangen fort. Nach 7 klinischen Semestern legte ich in Erlangen am 5. August 1976 die ärztliche Prüfung ab.

Erlangen, im August 1976

Wolfgang Albert Berger

